

气候变化情景下滇重楼在中国的适生性分析

张保得¹, 蔡吹¹, 谢准¹, 余红娅¹, 刘光华¹, 吕德芳², 袁丽萍², 胡艳芳², 徐福荣¹

(¹云南中医药大学中药学院, 昆明 650500; ²曲靖市沾益区生物资源开发技术推广站, 云南曲靖 655000)

摘要: 气候变化影响着物种的生态适宜性分布, 预测物种潜在适生区对生物多样性的保护具有重要意义。该研究以滇重楼为研究对象, 基于MaxEnt模型和ArcGIS软件, 结合中国境内128条滇重楼有效分布点记录和32个生态因子进行模拟预测, 筛选影响其生态适宜性分布的主导生态因子, 并预测在末次盛冰期、全新世中期、当前和未来时期(2050s、2070s)3种不同温室气体排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)下潜在适生区分布及质心迁移趋势。结果表明, MaxEnt模型预测结果精度极高, 曲线下面积值(AUC, area under curve)在各时期的均值为0.951。影响滇重楼生态适宜性分布的主导生态因子为年均降水量、温度季节性变化系数、最暖季度平均降水量和海拔。自末次盛冰期以来滇重楼潜在适生区显著变化区域主要在高适生区, 尤其在未来自来温室气体高排放情景下缩减区域较大, 缩减面积最大达到 $16.86 \times 10^4 \text{ km}^2$, 缩减区域主要集中在四川东北部地区, 同时, 质心分析显示在气候变化情景下滇重楼高适生区质心呈高纬度、高海拔迁移的趋势。该研究表明全球气候的变暖导致滇重楼高适生区生境缩减, 为滇重楼引种栽培和野生资源合理应用提供理论基础。

关键词: 滇重楼; 气候变化; MaxEnt模型; 潜在适生区

Ecological Suitability of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* in China under the Situation of Climate Change

ZHANG Baode¹, CAI Chui¹, XIE Zhun¹, YU Hongya¹, LIU Guanghua¹, LYU Defang²,
YUAN Liping², HU Yanfang², XU Furong¹

(¹College of Traditional Chinese Medicine, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500;

²Qujing Zhanyi District Bio-resource Development and Technology Promotion Station, Qujing 655000, Yunnan)

Abstract: The impact of climate change on the ecological suitability of species is a crucial concern for biodiversity conservation. This study employed a combination of 128 reliable distribution records of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* in China and 32 bioclimatic variables utilizing the MaxEnt model and ArcGIS software, in order to investigate the primary ecological factors that influence the distribution of ecological suitability for this species. Furthermore, we have made projections regarding the spatial distribution pattern of potential suitable areas and the trajectory of centroid displacement during the last glacial maximum, the middle holocene, the present, and future periods (2050s, 2070s) under three distinct greenhouse gas emission scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). The findings indicate that the MaxEnt model exhibited a remarkable level of precision in its predictions, as evidenced by a mean AUC value of 0.951 across all time periods. Notably, the geographical distribution of the studied entity was primarily influenced by several significant bioclimatic factors, namely precipitation annually, seasonality of temperature, warmest quarter precipitation, and elevation. Since the last glacial maximum, the areas of significant change in the potential habitat of Dianzhilou have been

收稿日期: 2023-12-26 网络出版日期: 2024-07-18

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20231226002>

第一作者研究方向为药物资源开发与利用, E-mail: 18469195080@163.com; 蔡吹为共同第一作者

通信作者: 徐福荣, 研究方向为中药资源开发与利用, E-mail: xfrong99@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(82060694, 81860674); 云南省科技计划项目(202304BI090004); 云南省科技人才和平台计划(202105AG070012)

Foundation projects: The National Natural Science Foundation of China (82060694, 81860674); Science and Technology Project of Yunnan Province(202304BI090004); Yunnan Science and Technology Talent and Platform Program (202105AG070012)

concentrated in the high habitability zone. Particularly, under the projected scenario of high greenhouse gas emissions in the future. In this scenario, the area of shrinkage reaches a maximum of $16.86 \times 10^4 \text{ km}^2$, primarily concentrated in the northeastern region of Sichuan province. Simultaneously, the analysis of centroids revealed a tendency for the distribution of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* to shift towards latitudes and altitudes of greater magnitude in response to climate change scenarios. These findings suggested that global warming contributed to the contraction of areas highly conducive for *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. Consequently, the outcomes of this study furnish a theoretical framework for the judicious utilization of wild resources pertaining to *P. polyphylla* var. *yunnanensis*.

Key words: *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; climate change; MaxEnt model; potential suitable area

随着全球变暖趋势的加速,气候因素成为了影响物种多样性的主要因素之一^[1]。自末次盛冰期以来,气候的变化对地球上的物种产生了影响,使得物种潜在适生区发生变化^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC, intergovernmental panel on climate change)第五次评估报告^[3]显示,在过去 100 多年来,由于全球气候变暖和极端天气频发引发的地质变化使得物种的生长适宜地区急剧缩小,影响到了物种的多样性。目前,物种的适宜性分布研究已成为一大热点,主要借助生态位模型(ENMs, environmental niche models)预测评价生境,其中 MaxEnt 模型具有操作简便、预测结果精确和可信度高等特点,预测结果相较于其他同类型的模型更为准确^[4-5]。通过分析适生区域的潜在变化情况,进而采取有利的调控措施,对于物种的保护具有重要意义^[6]。

滇重楼 [*Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* (Franch.) Hand.-Mazz] 为百合科重楼属植物,其药用历史悠久,曾载于《神农本草经》、《本草纲目》和《植物名实图考》,以中药重楼的基原植物之一载于历版《中国药典》中,其性微寒,味苦,有小毒,归足厥阴肝经,具有清热解毒、消肿止痛、凉肝定惊的功效^[7-8]。滇重楼主要分布在我国西南地区,生长于海拔 1400~3100 m 的常绿阔叶林下,为阴生植物^[9]。当前,以滇重楼为原料的中成药研究增加,且其成药时间较长(大约需 8~9 年时间),不间断地采挖致使滇重楼种质资源遭到破坏,野生资源濒临枯竭^[10]。因此,为满足中药材市场的需求,通过充分研究气候变化背景下滇重楼适宜性分布特征及变化趋向,指导其人工栽培区域合理种植已刻不容缓。

目前,滇重楼的研究主要集中于化学成分、药理作用及活性成分分子机制等方面的研究^[11-13],对滇重楼的适宜性分布的研究较少^[14],而对滇重楼过去至未来时期的适生区域分布变化鲜有研究。通

过研究过去、当前和未来滇重楼的分布区划,考察其生境特点,可为滇重楼人工种植提供理论基础。因此,本研究运用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 技术结合滇重楼分布点数据和生态变量模拟预测末次盛冰期、全新世中期、当前和未来时期滇重楼的潜在适生区,并根据适宜性分布与生态因子的响应关系筛选影响滇重楼适宜性分布的主导因素,旨在探明气候变化对滇重楼生态适宜性分布的影响机制,以期支撑滇重楼的引种栽培,为滇重楼的种质资源保护、野生资源驯化、GPA 基地建设和野生资源合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

通过全球生物多样性信息网(GBIF, global biodiversity information facility, <http://www.gbif.org>),国家植物标本资源库(CVH, Chinese virtual herbarium, <http://www.cvh.ac.cn>)等数据库和野外实地获取滇重楼的分布数据,初步获得 295 个该物种的分布点,其中包含数据库中 269 个,野外实地 26 个。利用 GPS 工具箱筛除重复和经纬度不准确的点。为了避免数据分布点过于靠近造成模型过度拟合的现象发生,使用 ArcGIS 10.7^[15] 设置样本分布点缓冲区为 5 km,每个缓冲区内保留 1 个样本分布点。最终得到 128 个滇重楼有效分布点(图 1)。

1.2 生态变量数据的获取与筛选

通过实地考察滇重楼生境,当前时期生态因子选用影响其生长的 32 个生态因子,包括 19 个气候因子、12 个风速变量(<https://www.worldclim.org>)和 1 个海拔数据(<http://www.gscloud.cn>)。过去时期选用末次盛冰期(约 22000 年前)、全新世中期(约 6000 年前)的生态数据。未来气候数据选用联合国政府间气候变化专门委员会的 CCSM4 数据路径,包括 2050s(2041-2060 年)、2070s(2061-2080 年)的 3

种不同(低、中、高)温室气体排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)^[16],以上数据的空间分辨率均为2.5'。为防止由于生态因子相关性过高造成模型过

度拟合现象的出现,该研究运用SPSS 25.0和Origin 2021进行Pearson相关性分析,剔除相关性高($|r| > 0.8$)且模型贡献率低于1.0%的生态因子^[17]。

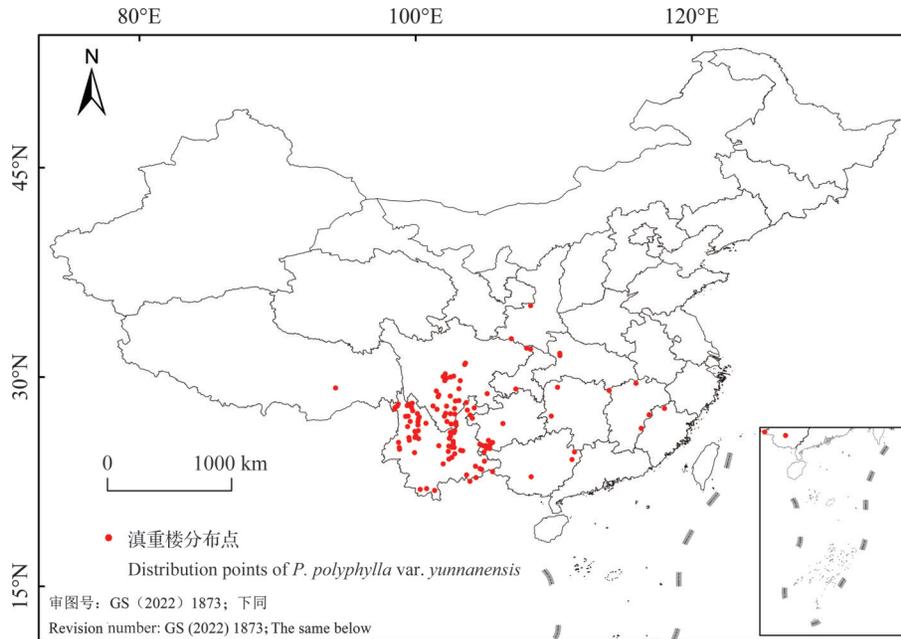


图1 去冗余后的滇重楼有效分布点

Fig.1 Distribution points of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* after data cleaning

1.3 MaxEnt模型构建及精度检测

将获取的滇重楼分布点坐标(CSV格式)与生态变量(ASC格式)导入MaxEnt模型(Version 3.4.4)中,随机以25%的分布点为测试集(Testing data)验证测试模型,剩余75%的分布点为训练集(Training data)模型构建,利用刀切法(Jackknife)分析每个气候因子在预测中对模型的贡献率检验权重,其他参数设定为软件默认值,最终输出结果为10次重复模拟的平均值^[18]。

MaxEnt模型预测的准确性基于创建受试者工作特征曲线(ROC, receiver operating characteristic curve),利用曲线下面积值(AUC, area under curve)评价。AUC的范围为0.5~1,越靠近1,预测准确性越高。AUC在0.5~0.6时,模型预测为失败,在0.6~0.7时,模型预测较差,在0.7~0.8时,模型预测一般,在0.8~0.9时,模型预测较好,在0.9~1时,模型预测极好^[19]。

1.4 适生等级的划分

将MaxEnt模型输出的结果文件导入ArcGIS 10.7中,采用“Spatial analyst tools”中的“reclassify”命令,根据自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)进行可视化处理^[20]:高适生区为0.49~1、中适生区为0.25~0.49、低适生区为0.07~0.25、非适生区为0~

0.07,获得滇重楼适生区分布图。

1.5 物种适宜分布区空间格局变化与质心迁移分析

为探明不同气候情景下滇重楼空间分布变化特征,利用ArcGIS的重分类工具将不同时期的适生区进行二值化分类^[21],划定0~0.07为非适生区,0.07~1为适生区,通过叠加分析工具得到保留区、增加区和丧失区,计算获得保留、新增和丧失区域的面积及其变化率。同时选用滇重楼高适生区绘制质心迁移趋势图以显著体现其地理分布变迁趋势,运用SDMtoolbox工具划分0.49~1为高适生区计算不同时期的潜在高适宜分布区的质心^[22],分析质心的迁移路径,反映出不同时期的气候变化对滇重楼最适宜分布区域的影响。

2 结果与分析

2.1 影响滇重楼适生区预测的主导生态变量

以剔除相关性高($|r| > 0.8$)且模型贡献率低于1.0%的标准,在32个生态因子中筛选得到10个生态变量(表1、图2)。生态因子的贡献率(Contribution percentage)结果表明年平均降水量、海拔和温度季节性变化系数排名靠前,累积贡献率为83.4%(表1)。置换重要值(Importance of permutations)前

三位依次为温度季节性变化系数、最暖季度平均降水量和昼夜温差月均值,累积置换重要值为 79.7%。利用刀切图 Jackknife 分析单一生态变量可知(图 3),对正则化训练增益和测试增益影响较大

的因子为温度季节性变化系数、年平均降水量和最暖季度平均降水量。综上,影响滇重楼适宜性分布的主导生态因子为年平均降水量、温度季节性变化系数、最暖季度平均降水量和海拔。

表 1 主导生态变量的评价

Table 1 Evaluation of dominant ecological variables

生态因子 Bioclimatic variables	变量描述 Variable description	贡献率(%) Contribution percentage	置换重要值(%) Importance of permutations
bio12	年平均降水量	44.6	1.1
elev	海拔	19.9	5.4
bio4	温度季节性变化系数	18.9	49.7
bio18	最暖季度平均降水量	9.2	21.1
wind10	10月平均风速	2.6	2.0
bio2	昼夜温差月均值	1.5	8.9
bio9	最干燥季度平均温度	1.4	4.9
wind4	4月平均风速	1.2	2.7
bio15	雨量变化方差	0.5	3.1
bio19	最冷季度平均降水量	0.2	1.1

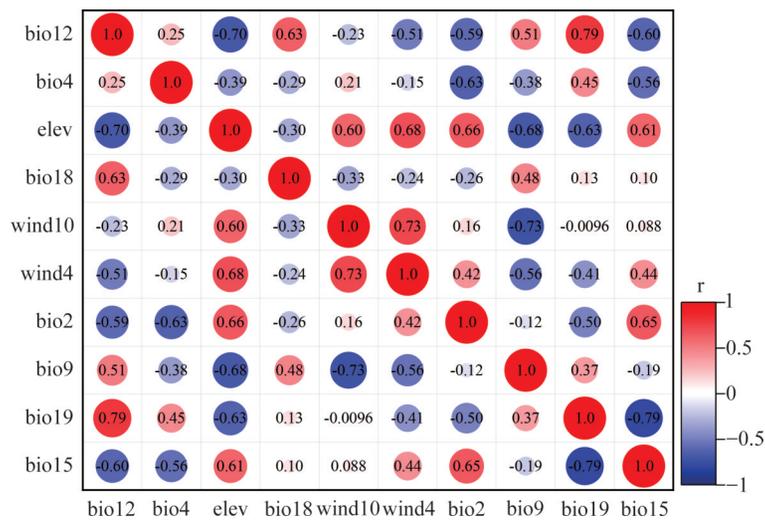


图 2 影响滇重楼适应性分布的生态变量相关性分析热图

Fig.2 Heat map of relationship of bioclimatic variables affecting potential distribution of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

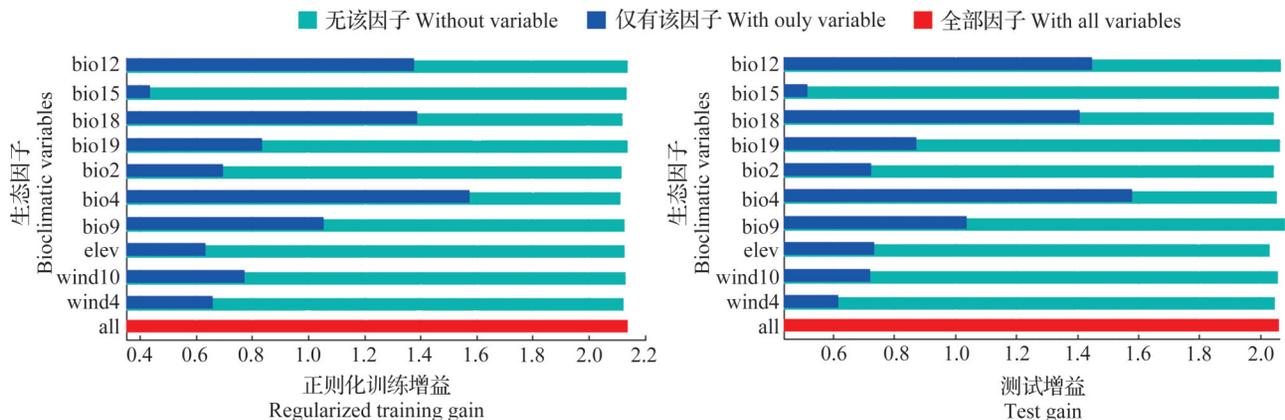


图 3 主要生态因子的刀切法评价

Fig.3 Evaluation of major bioclimatic variables by Jackknife method

利用上述筛选出的4个主导生态因子分别进行单因子建模,绘制单因子响应曲线。根据滇重楼对生态变量的响应情况设置存在概率值为0.5,以存在概率大于0.5为适宜范围^[23]。由图4可知,随着年平均降水量(bio12)的升高,滇重楼生存概率逐步增大,在年平均降水量为950.6 mm时,滇重楼适应性分布概率达到最高,随后其分布概率随着年平均降水量的增加

而下降,温度季节性变化系数(bio4)、最暖季度平均降水量(bio18)和海拔(elev)也呈现同年平均降水量(bio12)相似的变化趋势。存在概率大于0.5为滇重楼适宜范围,年平均降水量、温度季节性变化系数、最暖季度平均降水量和海拔适宜范围分别在880~1246 mm、3709~5409、538~776 mm、1451~3493 m,存在概率峰值分别对应950.6 mm、4355、578.8 mm、2024 m。

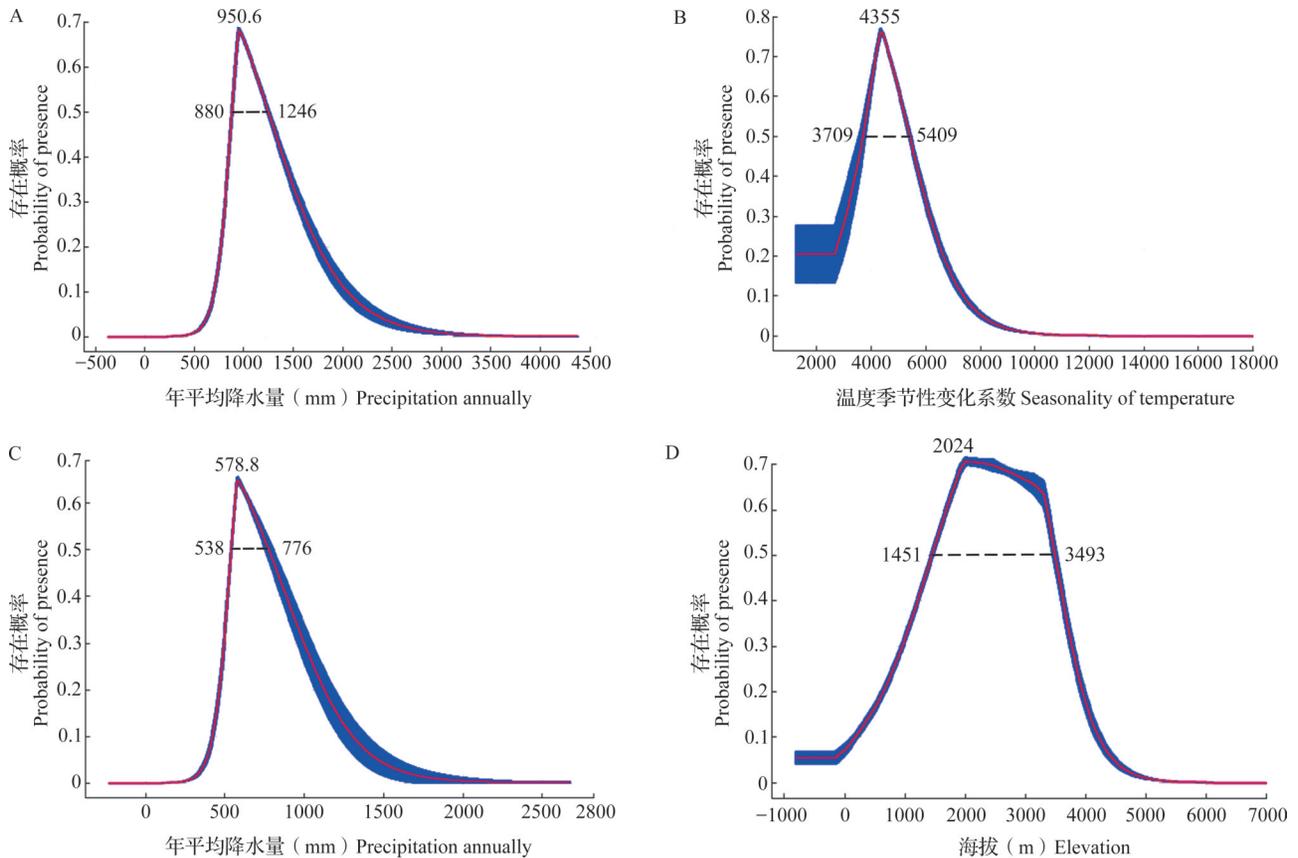


图4 滇重楼对主要生态变量的响应曲线

Fig.4 Response curve of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* to bioclimatic variables

2.2 MaxEnt模型精确度分析

利用MaxEnt模型结合筛选出的10个生态因子运算后,得到AUC值为0.951(图5),大于0.9,模拟结果表明MaxEnt模型预测滇重楼适生区精确度极高,结果可信度较高。

2.3 气候变化情景下滇重楼适生区域的变化

统计不同时期的滇重楼潜在适生区面积及其变化(表2)可以看出,从末次盛冰期到未来时期,滇重楼适生区域的变化主要在高适生区,呈缩减趋势,且预测结果表明在未来2个时期高浓度排放情景下高适生区缩减较明显,尤其在2070年RCP8.5情景下缩减至最小,缩减面积最大达到 $16.86 \times 10^4 \text{ km}^2$,说明滇重楼较难适应未来温室气体高排放的环境,气候变暖将会制约其适宜性分

布。滇重楼在末次盛冰期的高适生区域为最高,其潜在分布面积为 $48.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。相较于末次盛冰期,全新世中期高适生区潜在分布面积 $38.92 \times 10^4 \text{ km}^2$,缩减了0.9%,当前时期缩减了1.2%。在2050年3种不同温室气体排放情景下高适生区潜在分布面积分别为 $34.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $33.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $33.92 \times 10^4 \text{ km}^2$,相较于末次盛冰期时期,分别缩减1.4%、1.5%、1.5%;在2070年RCP2.6和RCP4.5排放情景下高适生区比末次盛冰期时期均缩减1.5%。由图6可以看到,滇重楼高适生区域生境破碎化明显,四川、贵州、广西的部分区域由高适生区变为中低适生区,最适宜生长区域在逐渐缩小,呈现向四川西南部集中的趋势。综上表明全球气候变暖不利于滇重楼最适宜分布区域的扩张。

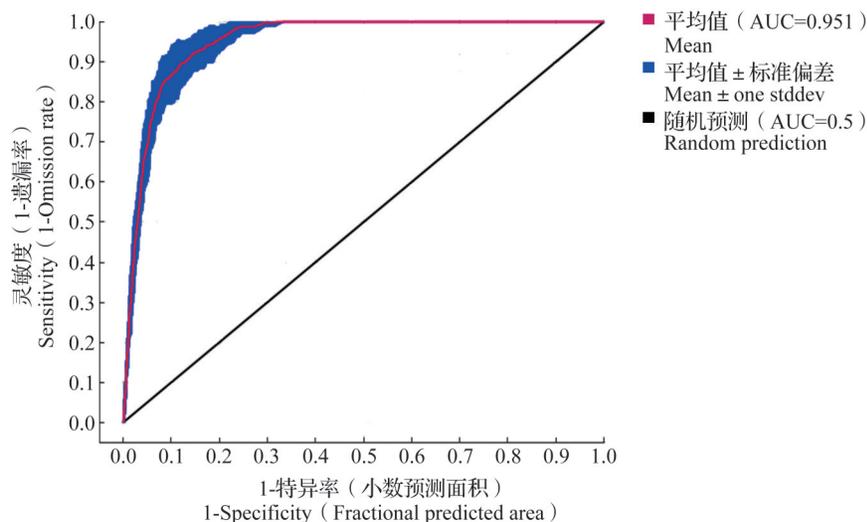


图5 MaxEnt模型预测受试者工作特征(ROC)曲线
Fig.5 The ROC curve of MaxEnt model prediction

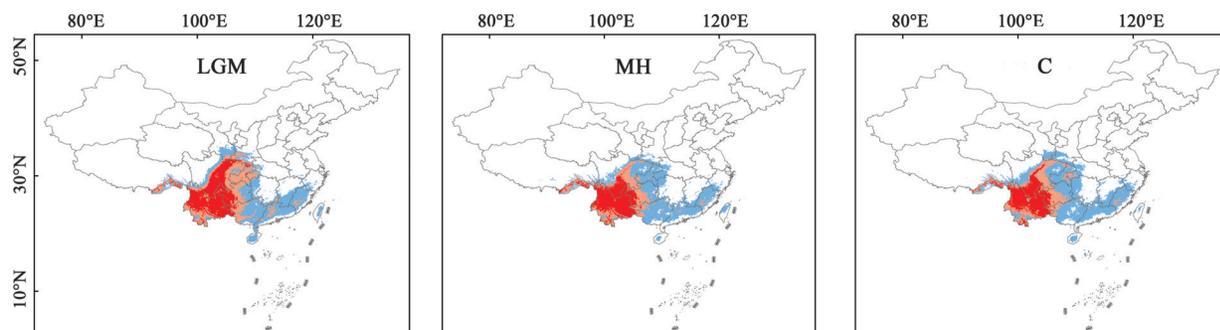
表2 不同时期滇重楼适生区面积和占比

Table 2 Different periods of suitable zone for *P. polyphylla* var. *yunnanensis* area and percentage

时期 Period	非适生区 Non-suitable area		低适生区 Lowly suitable area		中适生区 Moderately suitable area		高适生区 Highly suitable area		总适生区 Total suitable area	
	面积 ($\times 10^4$ km 2)	占比 (%)	面积 ($\times 10^4$ km 2)	占比 (%)	面积 ($\times 10^4$ km 2)	占比 (%)	面积 ($\times 10^4$ km 2)	占比 (%)	面积 ($\times 10^4$ km 2)	占比 (%)
	Area	Percentage	Area	Percentage	Area	Percentage	Area	Percentage	Area	Percentage
末次盛冰期 LGM	794.27	82.7	70.90	7.4	46.48	4.8	48.35	5.0	165.73	17.3
全新世中期 MH	811.15	84.5	79.99	8.3	29.94	3.1	38.92	4.1	148.85	15.5
当前时期C	799.57	83.3	89.82	9.4	34.23	3.6	36.38	3.8	160.43	16.7
2050s RCP2.6	805.09	83.9	88.15	9.2	32.54	3.4	34.23	3.6	154.91	16.1
2050s RCP4.5	792.94	82.6	97.13	10.1	36.74	3.8	33.19	3.5	167.06	17.4
2050s RCP8.5	790.24	82.3	102.54	10.7	33.31	3.5	33.92	3.5	169.76	17.7
2070s RCP2.6	795.44	82.9	94.52	9.8	36.11	3.8	33.92	3.5	164.56	17.1
2070s RCP4.5	793.30	82.6	96.66	10.1	36.29	3.8	33.76	3.5	166.70	17.4
2070s RCP8.5	789.94	82.3	99.08	10.3	39.50	4.1	31.49	3.3	170.06	17.7

RCP: 典型浓度路径; RCP2.6: 温室气体低排放情景; RCP4.5: 温室气体中排放情景; RCP8.5: 温室气体高排放情景; 下同

LGM: Last glacial maximum; MH: Mid holocene; C: Current; RCP: Representative concentration pathways; RCP2.6: Low concentration greenhouse gas emission scenario; RCP4.5: Medium concentration greenhouse gas emission scenario; RCP8.5: High concentration greenhouse gas emission scenario; The same as below



(图6)

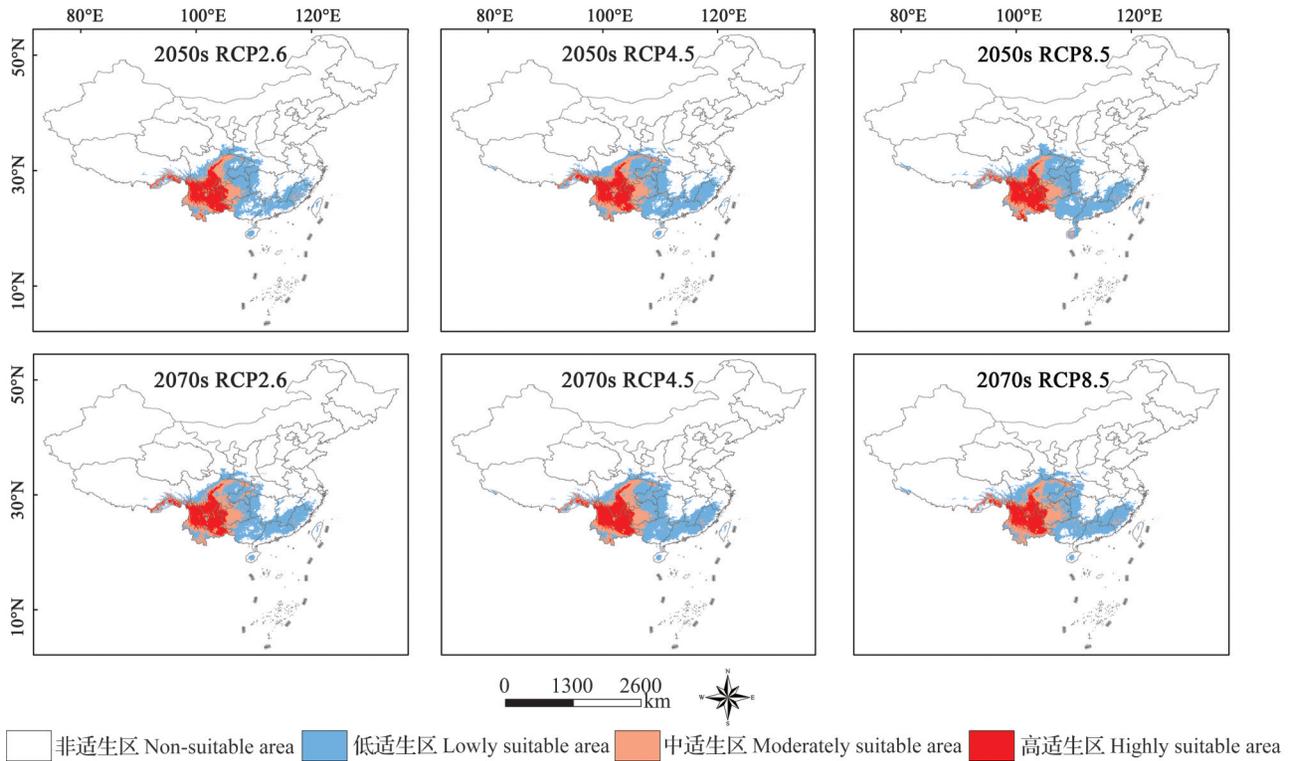


图6 不同气候变化情景下滇重楼潜在适生区预测

Fig.6 Potential distribution of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* under different climate scenarios

2.4 不同时期滇重楼空间分布变化

将不同气候情景下滇重楼潜在适生区进行分布叠加对比分析(表3、图7),与当前时期相比,过去时期的新增率在2.6%~9.1%,新增区域主要在广西、广东两省,丧失率在5.7%~9.8%,丧失区域主要在湖南、江西两省,表明滇重楼开始呈现向中国西南部靠拢的趋势。在未来两个时期3种不同气候情景下,滇重楼新增区域面积在 $3.53 \times 10^4 \sim 17.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 范围内变化,新增区域主要在四川甘孜藏族自治

州、阿坝藏族羌族自治州及西藏昌都等地区,表明滇重楼开始明显向横断山脉地区迁移;丧失率在2.6%~5.7%范围内变化,中国华南区域的适生区丧失较严重,主要包括广西、广东和海南等地,表明滇重楼适生区域呈北移的迹象。通过对比新增率与丧失率,发现未来除2050s RCP2.6情景外,其余情景下均呈现新增大于丧失的情况,表明滇重楼适生区域向横断山区迁移的速率较快,未来此区域将会是滇重楼生长扩张的重要区域。

表3 不同气候情景下滇重楼适生区空间变化

Table 3 Period-related spatial changes in the habitat of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

时期 Period	面积($\times 10^4 \text{ km}^2$) Area			变化率(%) Change rate		
	增加区 Expansion	保留区 Unchanged	丧失区 Contraction	增加区 Expansion	保留区 Unchanged	丧失区 Contraction
末次盛冰期 LGM	14.62	151.13	9.22	9.1	94.3	5.7
全新世中期 MH	4.19	144.65	15.70	2.6	90.2	9.8
2050s RCP2.6	3.53	151.26	9.08	2.2	94.3	5.7
2050s RCP4.5	12.04	154.89	5.45	7.5	96.6	3.4
2050s RCP8.5	16.41	153.28	7.08	10.2	95.6	4.4
2070s RCP2.6	8.41	156.11	4.23	5.2	97.4	2.6
2070s RCP4.5	10.23	156.36	4.00	6.4	97.5	2.5
2070s RCP8.5	17.24	152.69	7.61	10.8	95.3	4.7

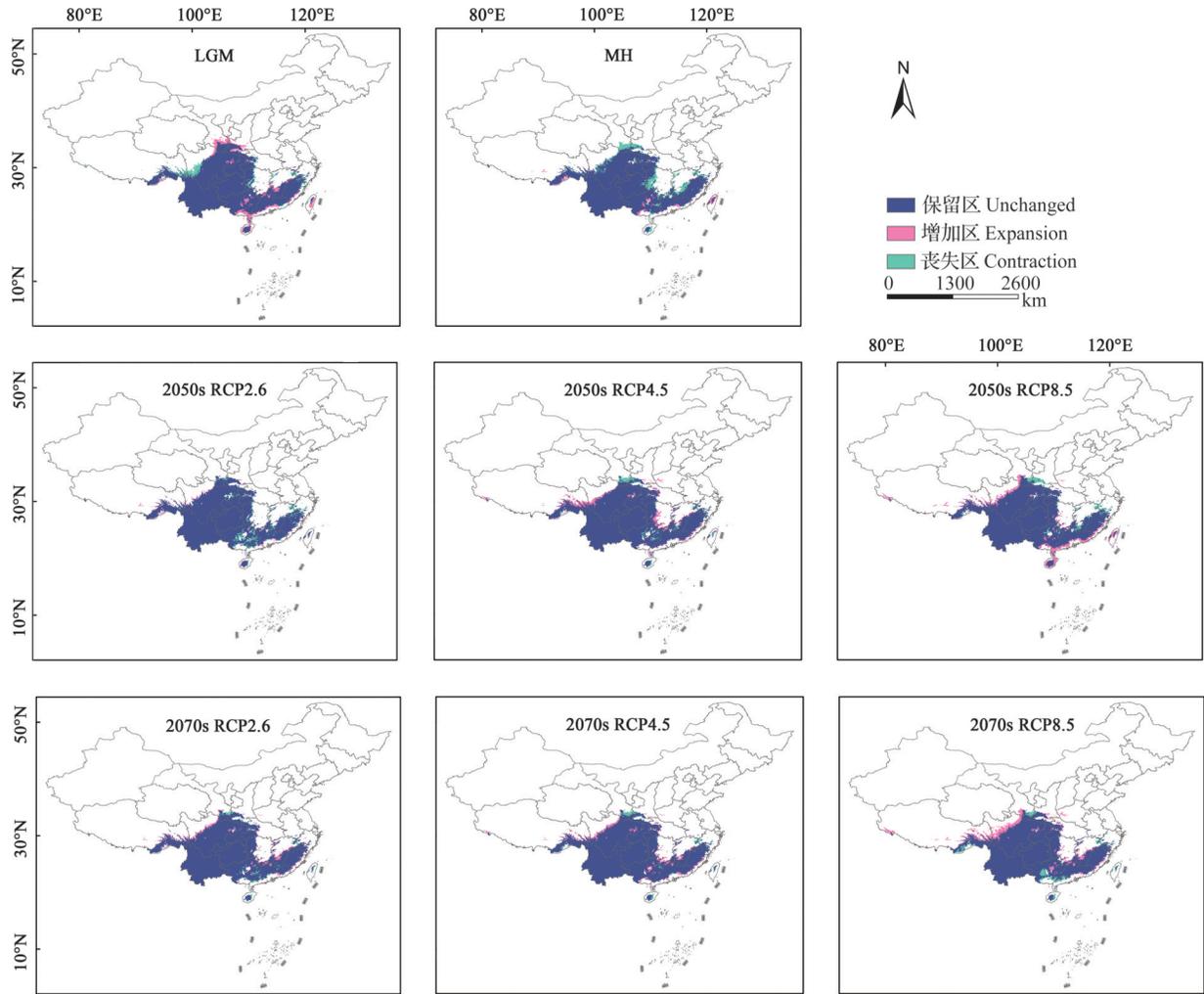


图7 气候变化情景下滇重楼潜在适生区空间格局变化

Fig.7 Suitable distribution changes of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* under different climate change scenarios

2.5 气候变化情景下滇重楼高适生区质心迁移趋势

质心能直观地表达滇重楼高适生区的地理变迁趋势。表4、图8显示出从未次盛冰期到未来高适生区质心迁移变化,从未次盛冰期到当前时期两个阶段的迁移幅度较大,均呈现向西迁移的趋势,由于末次盛冰期干冷的气候特点,其质心向南的趋势也较明显,两个阶段分别迁移73.84 km和72.72 km,从云南会泽县(26°58' N, 103°33' E)跨省迁移至四川米易县(26°53' N, 102°3' E)。未来气候情景下滇重楼质心的迁移在四川攀枝花市和凉山彝族自治县内,向高纬度高海拔地区迁移的趋势较明显。

相较于当前时期,未来在3种排放情景下,滇重楼质心均呈北迁之势,且在2070年高排放情景下迁移至最远,3种排放路径下,高排放情景的迁移幅度最大,分别迁移18.27 km和80.75 km。RCP2.6情景下两个时间段内,其质心分别北迁22.92 km和36.33 km;在RCP4.5情景下,其质心分别迁移32.65 km和58.81 km。在整个迁移变化过程中,滇重楼质心海拔总体呈上升的趋势,在未来2070s RCP8.5时达到最高,为2570 m。

表4 不同气候情景下滇重楼质心经纬度海拔变化趋势

Table 4 Alternational trends of longitude and latitude of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* under different climatic scenarios

时期 Period	末次盛冰期	全新世中期	当前时期	2050s			2070s		
	LGM	MH		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
纬度 Latitude	26°57'	26°50'	26°53'	26°58'	27°9'	27°2'	27°17'	27°40'	27°39'
经度 Longitude	103°33'	102°48'	102°3'	102°16'	102°8'	101°59'	102°19'	102°11'	101°34'
海拔(m) Elevation	1897	1880	1591	2304	1975	2074	1962	1608	2570

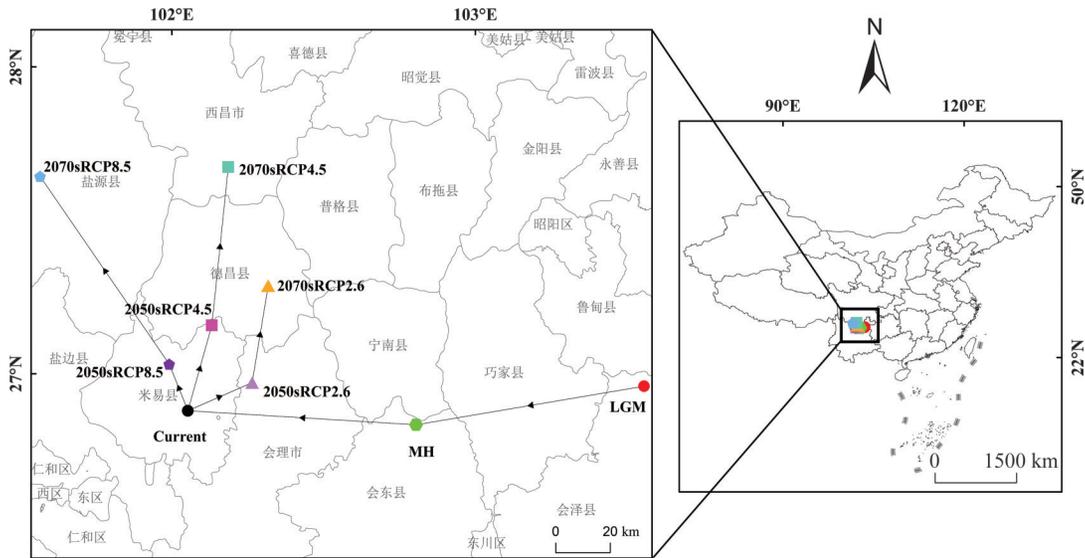


图8 气候变化情景下滇重楼潜在高适生区质心迁移趋势

Fig.8 Location of centroid shift of high suitable zone of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* under different climatic scenarios

3 讨论

3.1 影响滇重楼生态适宜性分布的主导生态因子

该研究利用MaxEnt模型结合ArcGIS软件预测气候变化情景下滇重楼的潜在适生区域,模型预测的AUC曲线均值为0.951,说明该研究的预测结果精确度极高,可用于预测分析滇重楼在气候变化情景下潜在适生区的变化。通过刀切图、生态因子百分贡献率和单因子响应曲线筛选出影响滇重楼适宜性分布的4个主导生态因子:年平均降水量(bio12)、温度季节性变化系数(bio4)、最暖季度平均降水量(bio18)和海拔(elev)。这与石子为等^[14]借助MaxEnt模型筛选的我国栽培滇重楼主导环境因子和姬柳婷等^[24]探讨制约北重楼生态适宜性分布的主要生态因子结果相类似。滇重楼作为多年生的草本植物,常以地下根茎作为入药部位,其生长周期较长,水分的缺失使得滇重楼出苗率显著降低^[25]。温度因素对打破滇重楼种子休眠起着显著的作用,滇重楼种子在自然环境中休眠可达18个月以上,适宜的温度有助于提高其种子的发芽率^[26]。海拔因素直接影响滇重楼花萼的光和特性,进而影响植物的生长^[27]。综上,降水因子、温度因子和海拔对滇重楼的生态适宜性分布共同起着极其重要的作用。

3.2 气候变化情景下滇重楼的潜在适宜分布区变化

基于MaxEnt模型探求滇重楼在不同气候背景下适宜分布区的变化情况,结果显示在末次盛冰期

滇重楼的扩增区域主要在华南地区,丧失区域在四川西北部,适生区靠近南方区域较明显。末次盛冰期的特点是温度和湿度偏低^[28],因此,此时期的滇重楼物种可能呈现向南迁移的趋势以获得所需的湿度以及温度。全新世中期滇重楼潜在适生区缩减严重,尤其以高适生区破碎化程度较为显著。研究发现全新世中期气候是历史上最近的温暖时期,且在该时期人类活动对气候环境影响显著加强^[29],因此推断人类的活动和温度的上升极大程度制约了滇重楼生态适宜性分布,从而导致了适生区域的缩减。

当前到未来时期,滇重楼的潜在高适生区缩减严重,适生区域的面积和空间分布均发生了改变,其适生区呈高海拔收缩的趋势,边缘区域破碎化加剧,尤其在未高排放情景下缩减幅度为最大,缩减面积最大达到 $16.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。有数学者得出在未来全球气候变暖的大背景下,大多数植物的适生区域呈现缩减的趋势,如邱浩杰等^[30]预测的红豆树(*Ormosia hosiei*)和邹旭等^[31]预测的中国山荆子(*Malus baccata* (L.) Borkh.)在未来时期高适生区均呈现大面积的萎缩。综上,在未考虑生物物种之间的相互作用和人类活动的情况下,滇重楼高适生区已呈现缩减的趋势,因此,在未来时期,滇重楼的生长和适生区域的扩张将受到制约,这为以后滇重楼野生资源的保护和合理利用提出了警示。

3.3 气候变化情景下滇重楼潜在高适生区质心分析

通过分析滇重楼适生区质心的迁移趋势发现,

自末次盛冰期到未来时期,滇重楼质心呈向西北高纬度和高海拔迁移的趋势。有研究发现,在全球气候变化的情景下,物种分布最近以每十年 11.0 km 的中位数速率向高海拔地区转移,以每十年 16.9 km 的中位数速率向高纬度地区转移^[32]。到未来时期,其质心呈高纬度高海拔迁移趋势,逐渐靠近横断山脉,在高排放情景下尤为明显。横断山脉地区地形地貌比较复杂,山脉可抵挡极端的气候环境,使得该区域的生态环境相对稳定^[33],成为滇重楼未来时期天然的庇护所。温室气体的排放浓度增加导致全球气候变暖,使得全球陆地生态系统结构、功能以及碳源汇特征和其他的生物地球化学循环过程可能发生改变,大多数动植物存在向高纬度高海拔发展的趋势^[34]。气候变化对生态系统的影响是一个方面,人类的活动和物种之间生存区域的竞争同样影响到物种的生态适宜性分布变化^[35-36]。因此,在以后的研究中可结合气候、人类活动和物种之间的相互影响因素以更加全面预测滇重楼的分布变化趋势。

4 结论

本研究基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 技术发现制约滇重楼生态适宜性分布的因子为年均降水量、温度季节性变化系数、最暖季度平均降水量和海拔,其适宜范围分别为 880~1246 mm、3709~5409、538~776 mm 和 1451~3493 m,其中降水为最重要因素。当前时期滇重楼主要分布于我国西南、华南和东南沿海地区,其中包括云南、四川、贵州、重庆全部区域和湖南、湖北、江西、福建、浙江、陕西、甘肃、西藏、海南、台湾部分地区。相对于当前时期,其他各个时期新增区域主要集中在横断山脉附近,丧失区域主要集中在我国华南地区,其中在未来温室气体高排放情景下高适生区丧失区域较大。此外,在气候变化情景下滇重楼高适生区质心呈高纬度高海拔迁移趋势。该研究只探明在气候变化情景下预测滇重楼在我国的适宜性分布,后续的研究建议结合气候、人类活动和物种之间的相互影响因素以更全面预测滇重楼的分布变化趋势。

参考文献

- [1] Skendžić S, Zovko M, Živković I P, Lešić V, Lemić D. The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, 2021, 12(5): 440
- [2] Ni J, Yu G, Harrison S P, Prentice I C. Palaeovegetation in China during the late quaternary: Biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 289(1-4): 44-61
- [3] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068-1076
- [4] Shen Y P, Wang G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076
- [5] Pio D V, Engler R, Linder H P, Monadjem A, Cotterill F P D, Taylor P J, Schoeman M C, Price B W, Villet M H, Eick G, Salamin N, Guisan A. Climate change effects on animal and plant phylogenetic diversity in southern Africa. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1538-1549
- [6] 郭水良, 高平磊, 娄玉霞. 应用 MaxEnt 模型预测检疫性杂草毒苣荬在我国潜分布范围. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2011, 29(5): 15-19
- [7] Guo S L, Gao P L, Lou Y X. Prediction of potential invasive range of quarantine weed *Lactuca serriola* in China by MaxEnt model. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2011, 29(5): 15-19
- [8] Zimmermann N E, Edwards Jr T C, Graham C H, Pearman P B, Svenning J. New trends in species distribution modelling. *Ecography*, 2010, 33(6): 985-989
- [9] 何良艳, 余美荣, 陈建真. 重楼的研究进展. *现代中药研究与实践*, 2011, 25(6): 94-97
- [10] He L Y, Yu M R, Chen J Z. Research progress of *Paris*. *Research and Practice on Chinese Medicines*, 2011, 25(6): 94-97
- [8] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典一部. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 271
- [11] National Pharmacopoeia Committee. *Chinese pharmacopoeia part 1*. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 271
- [9] 李恒. 重楼属植物. 北京: 科学出版社, 1998: 36
- [12] Li H. The plants of the genus *Paris*. Beijing: Science Press, 1998: 36
- [10] Qin X J, Sun D J, Ni W, Chen C X, Liu H Y. Steroidal saponins with antimicrobial activity from stems and leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. *Steroids*, 2012, 77(12): 1242-1248
- [11] 董汛, 蒋维, 万近福, 李小辉. 滇重楼茎叶化学成分研究. *中草药*, 2023, 54(9): 2705-2709
- [12] Dong X, Jiang W, Wan J F, Li X H. Chemical constituents from stems and leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2023, 54(9): 2705-2709
- [12] 彭寿杰, 蔡吹, 李丹丹, 赖佳辉, 赵艳丽, 徐福荣. 滇重楼和长柱重楼实时荧光定量 PCR 内参基因的筛选和验证. *植物生理学报*, 2023, 59(5): 997-1007
- [12] Peng S J, Cai C, Li D D, Lai J H, Zhao Y L, Xu F Y. Screening and validation of reference genes for real-time fluorescence quantitative PCR in *Paris polyphylla* var.

- yunnanensis* and *P. forrestii*. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(5): 997-1007
- [13] 王宇飞, 江媛, 杨成金, 王婧, 徐志超, 刘颖琳, 段宝忠. 滇重楼化学成分、药理作用和临床应用研究进展. *中草药*, 2022, 53(23): 7633-7648
Wang Y F, Jiang Y, Yang C J, Wang J, Xu Z C, Liu Y L, Duan B Z. Research progress on chemical constituents, pharmacological activities, and clinical applications of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2022, 53(23): 7633-7648
- [14] 石子为, 康利平, 彭华胜, 杨少华, 张丽霞, 景志贤, 陈敏, 刘大会. 我国滇重楼种植的气候适宜性研究. *中国中药杂志*, 2017, 42(18): 3435-3442
Shi Z W, Kang L P, Peng H S, Yang S H, Zhang L X, Jing Z X, Chen M, Liu D H. Climate suitability for potential *Pairs polyphylla* var. *yunnanensis* cultivation in China. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2017, 42(18): 3435-3442
- [15] 郭燕青, 史梦竹, 李建宇, 傅建炜, 吴梅香. 基于 Maxent 模型的假臭草潜在分布区预测. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(3): 250-260
Guo Y Q, Shi M Z, Li J Y, Fu J W, Wu M X. Prediction of potential distribution area of *Praxelis clematidea* based on Maxent model. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2019, 27(3): 250-260
- [16] 姬柳婷. 4种重楼属植物潜在适生区对气候变化的响应及主导气候因子分析. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020
Ji L T. Response of potential suitable distribution area of four *Paris* species to climate change and analysis of their dominant climate factors. Yangling: Northwest A & F University, 2020
- [17] 李建宇, 陈燕婷, 郭燕青, 何玉仙, 傅建炜, 史梦竹. 基于 MaxEnt 预测未来气候条件下钻叶紫菀在中国的潜在适生区. *植物保护*, 2023, 49(2): 92-102
Li J Y, Chen Y T, Guo Y Q, He Y X, Fu J W, Shi M Z. Potential suitable areas of *Symphotrichum subulatum* based on MaxEnt under future climate scenarios. *Plant Protection*, 2023, 49(2): 92-102
- [18] 汤思琦, 武扬, 梁定东, 郭恺. 未来气候变化下栎树猝死病菌在中国的适生性分析. *生态学报*, 2023, 43(1): 388-397
Tang S Q, Wu Y, Liang D D, Guo K. Prediction of the potential ecological distribution of *Phytophthora ramorum* in China under future climate change. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 388-397
- [19] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293
- [20] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. *生态学报*, 2020, 40(18): 6552-6563
Zhang H, Zhao H X, Wang H. Potential geographical distribution of *populus euphratica* in China under future climate change scenarios based on Maxent model. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6552-6563
- [21] Liang Q, Xu X, Mao K, Wang M, Wang X Z, L J. Shifts in plant distributions in response to climate warming in a biodiversity hotspot, the Hengduan mountains. *Journal of Biogeography*, 2018, 45(6): 1334-1344
- [22] Li J, Chang H, Liu T, Zhang C. The potential geographical distribution of *Haloxylon* across Central Asia under climate change in the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 243-254
- [23] 王晓帆, 段雨萱, 金露露, 王崇云, 彭明春, 李云, 王旭红, 马云飞. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化. *生态学报*, 2023, 43(16): 6590-6604
Wang X F, Duan Y X, Jin L L, Wang C Y, Peng M C, Li Y, Wang X H, Ma Y F. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus* sect. *Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6590-6604
- [24] 姬柳婷, 郑天义, 陈倩, 钟娇娇, 康冰. 北重楼潜在适生区对气候变化的响应及其主导气候因子. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 89-96
Ji L T, Zheng T Y, Chen Q, Zhong J J, Kang B. Responses of potential suitable area of *Paris verticillata* to climate change and its dominant climate factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 89-96
- [25] 李纪潮, 左应梅, 张金渝, 杨美权, 杨天梅, 杨绍兵, 许宗亮. 温度、水分双因素复合胁迫下滇重楼种子的生理机制研究. *植物生理学报*, 2020, 56(11): 2439-2447
Li J C, Zuo Y M, Zhang J Y, Yang M Q, Yang T M, Yang S B, Xu Z L. Study on physiological mechanism of the seeds of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* under temperature and moisture of double factor stress. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(11): 2439-2447
- [26] Zhou L, Wu J, Wang S. Low-temperature stratification strategies and growth regulators for rapid induction of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seed germination. *Plant Growth Regulation*, 2003, 41: 179-183
- [27] 高成杰, 刘方炎, 杨文云, 周静, 唐国勇, 李昆. 不同海拔下滇重楼叶片与花萼光合特性. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 70-78
Gao C J, Liu F Y, Yang W Y, Zhou J, Tang G Y, Li K. Photosynthetic characteristics of leaf and calyx of *Pairs polyphylla* var. *yunnanensis* at different attitudes. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 70-78
- [28] Kozhoridze G, Orlovsky N, Orlovsky L, Blumberg D G, Golan-Goldhirsh A. Geographic distribution and migration pathways of *Pistacia* - present, past and future. *Ecography*, 2015, 38(11): 1141-1154
- [29] Ruddiman W F, Fuller D Q, Kutzbach J E, Tzedakis P C, Kaplan J O, Ellis E C, Vavrus S J, Roberts C N, Fyfe R, He F, Lemmen C, Woodbridge J. Late Holocene climate: Natural or anthropogenic? *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(1): 93-118
- [30] 邱浩杰, 孙杰杰, 徐达, 焦洁洁, 薛敏, 袁位高, 沈爱华, 江

- 波, 李胜. 末次盛冰期以来红豆树在不同气候变化情景下的分布动态. 生态学报, 2020, 40(9): 3016-3026
- Qiu H J, Sun J J, Xu D, Jiao J J, Xue M, Yuan W G, Shen A H, Jiang B, Li S. The distribution dynamics of *Ormosia hosiei* under different climate change scenarios since the Last Glacial Maximum. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 3016-3026
- [31] 邹旭, 彭冶, 王璐, 李垚, 张往祥, 刘雪. 末次盛冰期以来气候变化对中国山荆子分布格局的影响. 植物科学学报, 2018, 36(5): 676-686
- Zou X, Peng Y, Wang L, Li Y, Zhang W X, Liu X. Impact of climate change on the distribution pattern of *Malus baccata* (L.) Borkh. in China since the Last Glacial Maximum. *Plant Science Journal*, 2018, 36(5): 676-686
- [32] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(6045): 1024-1026
- [33] 杜志暄, 苏启陶, 周兵, 闫小红, 李晓红, 肖宜安. 不同气候变化情景下入侵植物大狼把草在中国的潜在分布. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2575-2582
- Du Z X, Su Q T, Zhou B, Yan X H, Li X H, Xiao Y A. Potential distribution of invasive species *Bidens frondosa* under different climate change scenarios in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2575-2582
- [34] Fang J Y, Zhu J L, Shi Y. The responses of ecosystems to global warming. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(2): 136-140
- [35] 张吉平, 苗露, 伍盘龙, 杨雪婷, 郭文永, 李士成, 冯刚. 人类活动和气候因子对中国外来入侵物种分布的影响. 中国科学: 生命科学, 2023, 53(4): 543-551
- Zhang J P, Miao L, Wu P L, Yang X T, Guo W Y, Li S C, Feng G. Effects of anthropogenic activities and climate factors on the distribution of invasive alien species in China. *Scientia Sinica: Vitae*, 2023, 53(4): 543-551
- [36] Blois J L, Zarnetske P L, Fitzpatrick M C, Finnegan S. Climate change and the past, present, and future of biotic interactions. *Science*, 2013, 341(6145): 499-504